

IPv6 への移行 ～次世代ネットワークを支える技術～

村井 純（慶應義塾大学 教授）

1999年12月15日

Internet Week 99 パシフィコ横浜

（社）日本ネットワークインフォメーションセンター編

この著作物は、Internet Week 99における村井 純氏の講演をもとに当センターが編集を行った文書です。この文書の著作権は、村井 純氏および当センターに帰属しており、当センターの同意なく、この著作物を私的利用の範囲を超えて複製・使用することを禁止します。

©1999 Jun Murai, Japan Network Information Center

目次

1	概要	1
2	IPv6 の必要性	1
3	IPv6 の技術	12
4	まとめ	20

1 概要

この講演では、「IPv6 への移行」という大変に重要な使命について述べていきます。これには、ソーシャルな動き、管理面での動き、技術面での動き等、さまざまな動きが必要となります。

そのために、まず「なぜ IPv6 が必要なのか」ということを理解して、それを広げていく (deployment していく) ことが重要です。このチュートリアルの本当の目的は、皆さんに IPv6 の伝道師となって頂くことにあります。したがって、ここでは次の事柄を説明していきます。

- ・なぜ IPv6 が必要なのか。
- ・いかに IPv6 を普及させていくか。

2 IPv6 の必要性

IPv6 の必要性を考える場合には、まず、なぜインターネットなのかということを理解しておかなければなりません。

2.1 インターネットは通信技術を隠蔽したものである

TV は電波を使った、同報的な一対多のコミュニケーションを行うテクノロジーです。ラジオが登場したときには、不特定多数を相手にしたコミュニケーションには有効なビジネスモデルがなく、成功しないと言われたものでした。ところが、宣伝という、当時は野蛮と考えられていたアイディアにより、ラジオがビジネスとして成立するものとなりました。TV も同様のビジネスモデルに基づいています。つまり、ラジオや TV の無線通信という技術はコミュニケーションの方法を規定しており、ビジネスモデルを制約しています。それらの制約の中で、メディアに応じた文化が成立しています。

しかし、インターネットでは、IP 層の下にある技術を自由に使うことができます。つまり、通信技術とは全く独立して、ビジネスモデルと文化を創造することができるということです。まさしく、新しいビジネスモデルが登場してくることがインターネットのデプロイメント (deployment) であり、最近のEコマースの流れはそれを裏付けるものです。

社会のインフラストラクチャを支えるためには、ビジネスとして成立するビジネスモデルが非常に重要です。TV の場合には、広告収入というビジネスモデルのみがあり、それが TV の文化を決定づけています。しかし、インターネットは「デジタル情報を自由にやりとりする」のみであり、その上に実現されるビジネスモデルは自由に展開することができます。誰もが新しいビジネスモデルを作れることが、極めて重要なインターネットの特徴です。

この自由なビジネスの創造性を維持するために、「インターネットはこれでいいのか」を考えることが重要です。これから述べていきますが、自由なビジネスの創造性を維持するためには、インターネットは IPv6 を使うものに変化しなければなりません。「自由な」コミュニケーションとビジネスモデル（アプリケーション）を求める気持ちが、IPv6 への移行の原動力なのです。

2.2 インターネットの成長

当たり前のこととしてインターネットは成長を続けています。

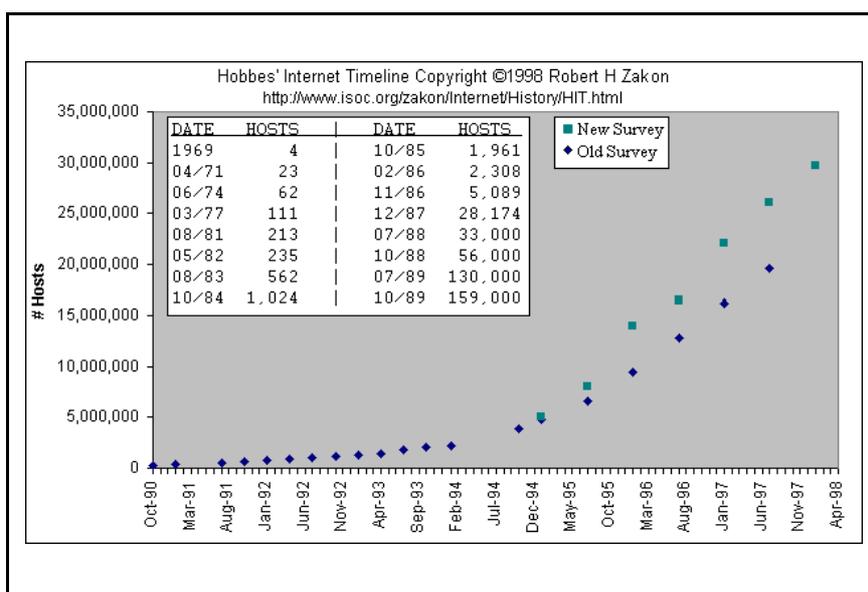


図 1：インターネットの成長

インターネットが登場した初期には、高価な投資をしなくても世界中の人が自由コミュニケーションできることが、そのデプロイメントの原動力でした。

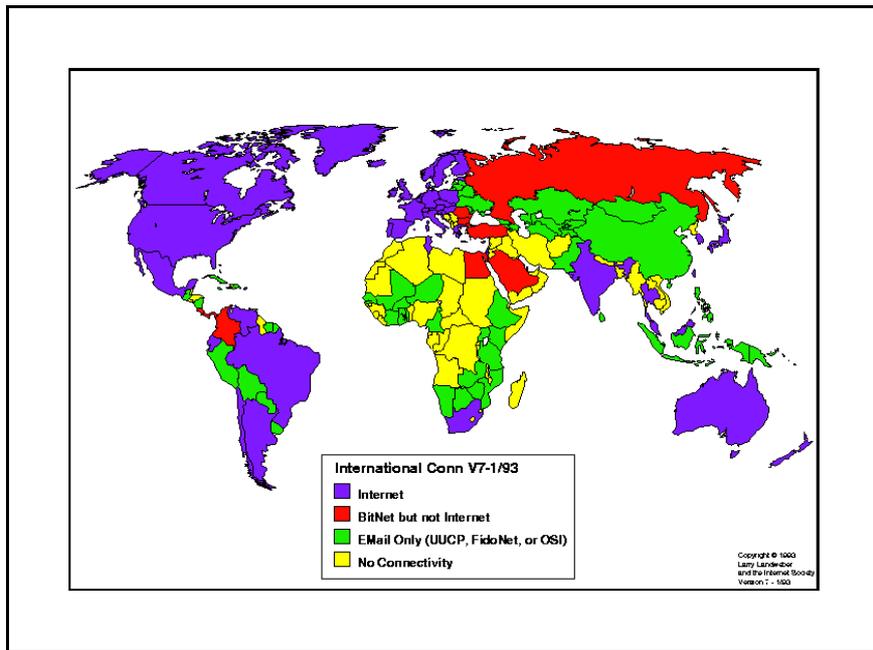


図 2：インターネットの普及（1993 年 1 月）

92 年に神戸で開催した第 1 回 INET では、約 100 カ国から 600 人程の参加者がありました。そこで行ったワークショップでは、参加された方々に、パソコンやワークステーション、ルータのセットアップ等を教育し、自国でインターネットを始めて貰うことを目指しました。この「インターネットを広げる」作業は、その後もずっと続けられています。

その結果、Dr. Larry Landweber による地図（図 2、図 3）に示されるように、その目標は既に達成されようとしています。97 年の Landweber マップ（図 3）は既に更新の必要がないものとして、最終版となりました。

2.3 インターネットのエンド - エンドモデル

米国商務省が発表した資料に、60% を超える人口がインターネットを利用している米国において、人種別・年収別・学歴別によってインターネット利用率を示したものがあります。想像に難くないように、その資料によれば、現在のインターネットは、高学歴高年収の一部の人種に限られて利用されていることが分かります。現在の米国経済成長のうち、IT 産業自体が 30% を、何らかの関わりがある業種が 60% を占めると言われています。インターネットを利用できるのが特権階級だけに限られるのではなく、インターネットがすべての人の為に使われるようになる必要があります。

そのためには、「エンド - エンド」というインターネットの特徴が非常に重要なものとなります (図 4)。エンド - エンドなシステムでは、両端のシステムが自律的に問題を解決する (作業する) ことで、中継を行う中間システムの負荷が軽くなり、スケールしやすいことが特徴です。インフラストラクチャとしての中間システムに社会資本を投資することで、これまでの電話網に比べればずっと安価に、インターネットをより広く普及させるための基盤を整備することができるのです。

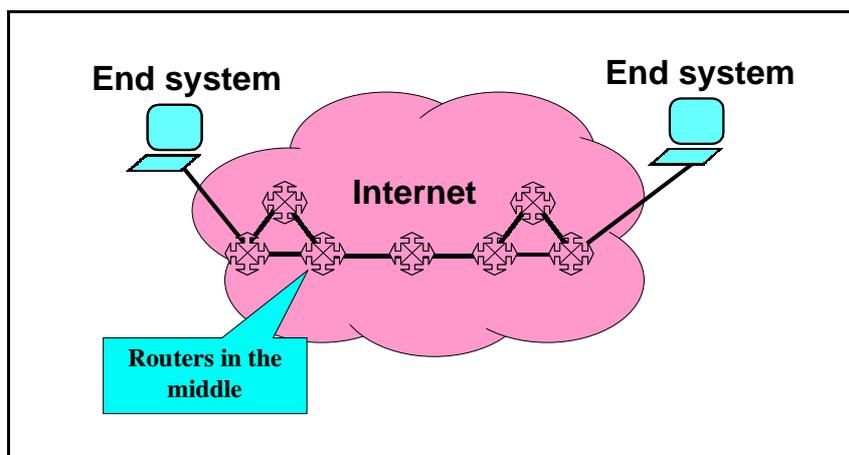


図 4 : インターネットのエンド - エンドモデル

2.4 エンド - エンドシステムの危機

繰り返しますが、ビット列を自由に、世界中で、誰とでもやりとりできることが、インターネットの役割です。その上で作られるビジネスは未知で自由です。たとえば、Yahoo が登場したときには、それを「どうお金にするのか」が分かっていませんでした。広告によるビジネスが考えられましたが、やがて、ユーザを識別することがビジネスに繋がると分かってきました。

現在、Amazon.com は、ディスカウントすることによって顧客情報を顧客自身から購入しています。そうやって集めた 1 千万人の顧客情報が持つ価値は、これまでの経済学では考えられないものです。Amazon.com の時価総額 1 兆円を 1 千万人で割れば、一人頭 10 万円の価値となります。一人分の詳細な顧客情報が 10 万円の価値を持つことが分かると、情報と引き替えに 10 万円程度の PC を無料で提供することもまたビジネスとして成り立ちます。これからも、インターネットでは、このように劇的に新しいビジネスモデルが登場する可能性があります。

網はビット列のやりとりだけであり、エンド - エンドシステムのみがサービスを定義するということが、このような自由を生み出します。逆に言えば、自由な創造性と活力を維持することこそが、インターネットの役割であり、そのためにはエンド - エンドであることが何にも増して重要なことなのです。

現在、プロキシやファイアウォールの存在により、そのエンド - エンドという特性が危機にさらされています。

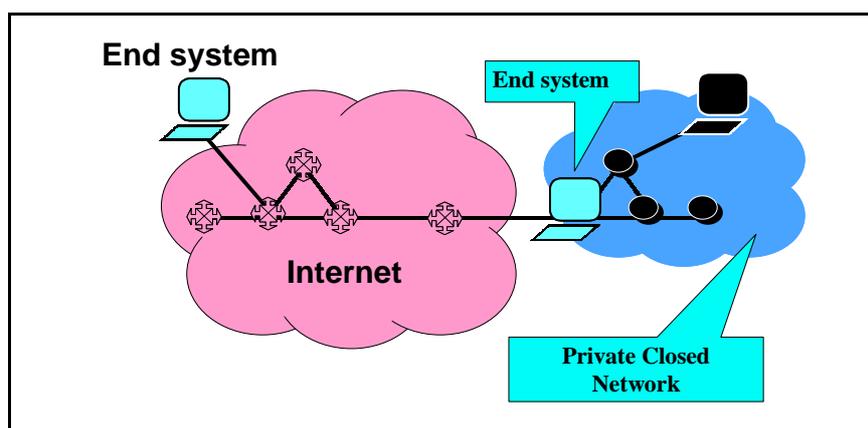


図 5 : 中間ノードによる囲い込み

ベトナムでの会議において、このような逸話がありました。Web をクリックしているアプリケーショングループは、すいすいインターネットを使っているのに、まず ping を使っている IP グループは、インターネットを使うことができないのです。ベトナムに限らず、政府のルールにより、このような制限を行っている所がいくつもあります。何を不安に感じているのか理解できませんから、インターネットをデプロイメントするという観点からは、そういった不安を取り除くための技術を開発していくことも重要です。

2.5 Native なインターネット

現在のインターネットは、世界中に張り巡らされた電話網の上にネットワークを構築した一種のエミュレーションです。電話網を使っているからこそ、ダイヤルアップ接続を使っており、時間による従量制の課金が発生しているのです。

電話網を使ったエミュレーションは成功しました。デジタル情報が自由にやりとりできるインターネットは役に立つことが実証されたのです。これからは、電話網の上にネットワークを作るのではなく、Native なインターネットを作っていくことになります。WDM による光ファイバを使って、常時接続することが当たり前のもとなり、時間単位の課金システムから自由になるのです。

Native なインターネットへの移行は、ダイヤルアップ接続がインターネットへの補佐的な接続方法となるだけでなく、プロキシやファイアウォールの役割に対するよりエレガントな解決が期待されます。繰り返しますが、エンド - エンドシステムであることこそが、インターネットが成功した最大の理由なのです。このため、エンド - エンドのシステムを阻害しない、よりトランスペアレントなもの、すなわち IP データグラムが最後まで行くというシステムを目指していかなければなりません。

2.6 研究開発とビジネス展開

かつて、インターネットが研究者のものであったころの技術開発は、研究者が行った基礎研究を基に、産業として製品開発が行われるものでした（図6）。

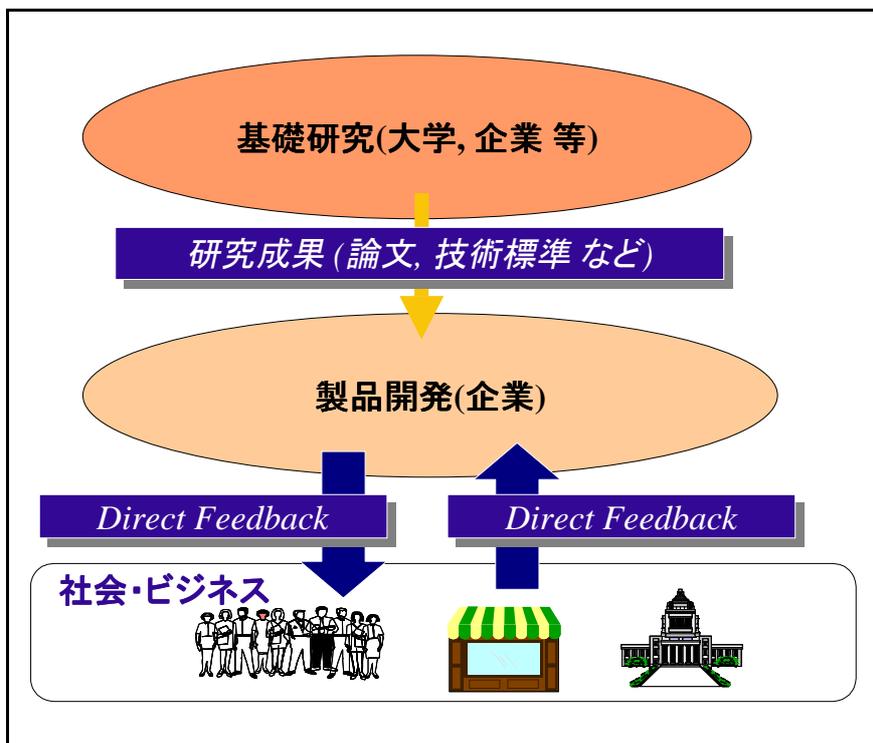


図6：従来の研究開発&ビジネスモデル

コンピュータネットワークの研究開発は、実利的なビジネスとして捕らえられたり、実際の役には立たないものと見なされたりすることもありました。たとえば、今でも、天文データの伝送や映画映像の伝送を考えると、ネットワークを使うよりも、磁気テープやDVDを宅急便で配送した方が遙かに速いという事実があります。

しかし、研究開発の成果は人や社会によって行われるものです。成果のフィードバックが、研究開発に戻ってくるものでなくてはなりません(図7)。

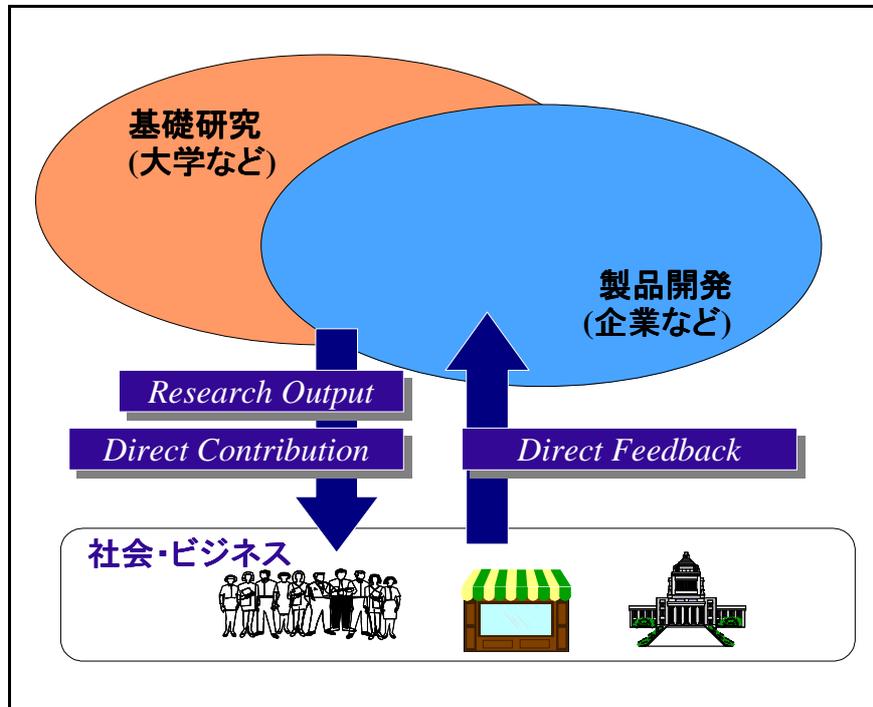


図7：インターネットにおける研究開発&ビジネス展開

ここに、「テストベッド」という考え方が出てきます。実際に役に立つものであることを納得させるためには、人間の創造性が発揮されて、世の中が変わっていくことを実際に見せなければなりません。これから、私たちはIPv6のデプロイメントという大きな作業に取りかかるわけですが、それにはまず、恩恵を得るに至るストーリーと、実際に動くものを作ることが重要となります。

実際に便利に動作しているネットワークの例として、米国 Wisconsin 大学における Dr. Landweber の授業をビデオストリーミングとして、次世代インターネット (IPv6 とマルチキャスト) 上で伝送する実験を行いました。これは、QoS による資源予約を使うのではなく、普通にコンジェスチョンが起こりうるネットワークの上で、フレームレートを調整しながら行うというもので、30Mbps から 15Mbps 程度の帯域を使用します。このようなプロダクションレベルのデモを見せることで、次世代インターネットの有用性を多くの方に納得して貰うことができます。

コラム：WAP

メールが読めて Web がつづける携帯電話が人気商品となっています。これは、インターネット端末でしょうか？ インターネットが使えるという点では、確かにインターネット端末です。しかし、たとえば WAP のシステムを考えると 2 つの問題があります。

- プロプライタリなシステムである。

WAP 内部の網にはプロプライタリなシステムが使われています。

なぜ内部は IP ではないのでしょうか？

WAP は「IP でできないか？」ということを検討せずに内部のシステムを決めてしまったのです。当然、内部のプロプライタリなシステムは、インターネットの急速な発展からは大きく出遅れていくことになります。

- 第 3 層にオーセンティケーションがある。

電波を使用することに対する課金を行うために、第 2 層にオーセンティケーションがあるのは当然のことでしょう。しかし、WAP では中間ノードにおける第 3 層にオーセンティケーションがあり、そこで課金を行うことが可能となっています。これでは、エンド - エンドシステムにおける自由なビジネスが展開できず、すべてを携帯電話屋さんが握るというモデルに限定されてしまいます。

つまり、WAP のシステムはエンド - エンドシステムではない可能性もあります。これを改善していく努力が必要です。

コラム：IPv6 が必要な 9 の理由

9位： モビリティが考慮されている。	IPv4 で培われた技術や考え方が、初めからエレガントに組み込まれています。
8位： セキュリティが考慮されている。	
7位： マルチキャストが考慮されている。	
6位： IP ヘッダがシンプルである。	中継ノードの負荷が軽くなり、中間点がスケールするものとなります。
5位： パケットフォーマットを拡張できる。	拡張性があります。
4位： ISP とサイトが独立になる。	アドレス不足が解消し、アドレス集積から独立できるため、サイトの融通性が増します。
3位： ISP がユーザをコントロールするのではなく、単純にサービスを提供するようになる。	
2位： ネットワーク管理者やプロバイダが特別な権限を持たなくなる。	
1位： エンド - エンドのインターネットモデルを維持できる！	

エンド - エンドシステムを考えた場合、1 つのグローバルな IP アドレスを持つものが一人前のノードとなります。世界人口が約 60 億人ですから、IPv4 の 40 億というアドレス空間はあまりにも小さすぎます。さらに、情報家電の登場等によって、ありとあらゆるものが IP を喋るようになる可能性を考えると、アドレス空間の拡張は、どうしても必要なものとなります。

3 IPv6 の技術

3.1 IPv6 制定の経緯

IPv4 から次世代の IP への切り替えにあたっては、次の 3 つの点が重要なものと考えられていました。

- アドレスが枯渇したからそれを変更しなければならない。
- IP のアーキテクチャに起因する問題をできるだけ解消したい。
- OSI のデータグラムとの整合を考えたい。

1992 年の INET において、IAB (Internet Architecture Board) は、IPv4 に次ぐ次世代の IP として、「IP version 7」と当時呼ばれたプロトコルを決定しました。これは、インターネットで OSI のデータグラムを使おうというものでしたが、IPv4 からの移行が全く考慮されていなかったため、すぐに取り下げられ、組織的にも大幅な見直しが行われました。そのときに最も重要と考えられたことは、今使っている人が困らないまま、いつの間にか移行が完了しているというトランジションのプロセスでした。

新しい組織の下で行われたその後の公募には、3 つ応募があり、次の 2 つが検討対象として残りました。

- TUBA (TCP/UDP with Bigger Addresses)

OSI の第 3 層データグラムの上に TCP と UDP を実装するもので、可変長の NSAP アドレスを使用します (IP version 7 の流れ)。

- SIPP (Simple Internet Protocol Plus)

IPv4 を単純化して、アドレス空間を 16 ビットに拡張したものです。

どちらも、機能的にはほとんどの要求条件を満たし、実験のための実装も稼働していました。大きな議論の後、プログラムの作りやすさという観点から、固定長アドレスを使用する SIPP が採用され、アドレス空間を 128 ビットに拡張することになりました。今後、IPv6 のインターネットを展開していくにあたっては、より多くのプログラマが簡単に扱うことができる必要があると判断されたのです。

アドレス割り当ての社会的なメカニズムは、IPv6 においても、ICANN の運用組織である IANA が、アドレスのアサインメントを大元で行うことに変更はありません。IPv4 アドレスの割り当てメカニズムを作るときに、ローカル言語での管理が必要であること、IANA の業務を分散して迅速な処理を可能とすること等を考慮して、大きな時差ブロックとして 3 つのリージョナルレジストリ (ARIN、RIPE、APNIC) が作られました。今後、リージョナルレジストリが増える可能性があります (アフリカと南米) が、IPv6 アドレスの割り当てにおいても、日本では APNIC からの割り当てを受けることになります。1999 年の 12 月現在、APNIC では 7 つ、ARIN では 2 つ、RIPE では 10 の組織にサブ TLA が割り当てられています。

その 1 つである WIDE プロジェクトでは、レジストリが使用するソフトウェアの開発等を行いながら、アドレスの割り当て業務を行っています。1999 年 12 月現在では、図 10 のような形での運用が行われています。

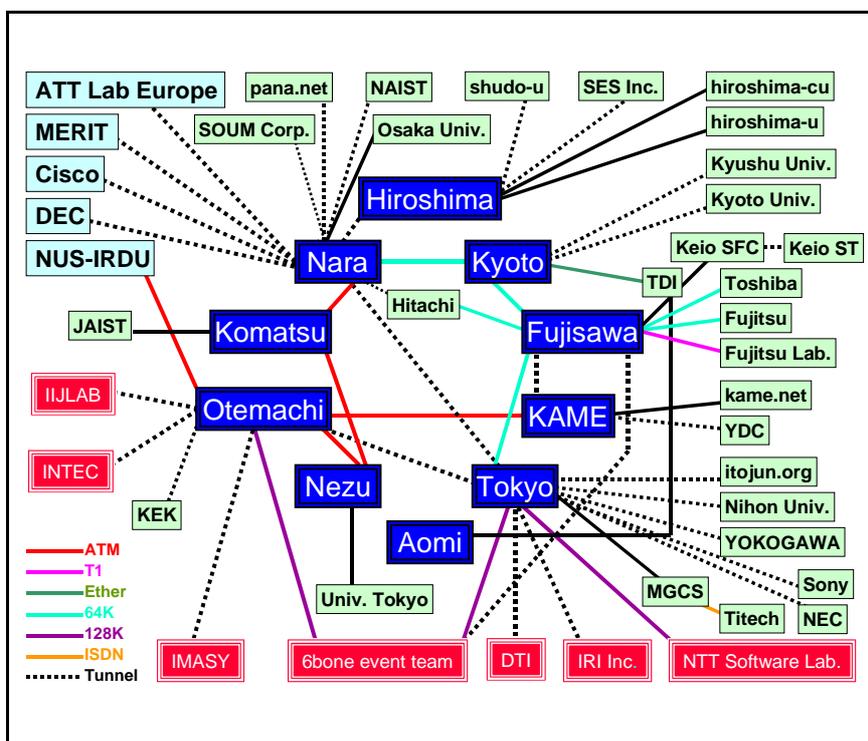


図 10 : WIDE プロジェクトにおける IPv6 ネットワーク

3.3 アプリケーションの移行

IPv6 への移行にあたっては、次の部分を変更していかなければなりません。

- オペレーティングシステムの IP と TCP/UDP プロトコルスタック
- アプリケーションのアドレス表現やプロトコル指定（変更は比較的少ない）

アプリケーションによっては、プロトコルの中に IP アドレスが埋め込まれているようなものがあります。そういったものの変更はかなり難しくなりますが、一般的なプログラムでは、使用するプロトコルに依存しないようにプログラムを書き直すこととなります。

現実に IPv6 を使用するアプリケーションの開発も、地道に進められています。KAME プロジェクトでは、既に日常的に使用するアプリケーションの多くを移行して実際に稼働させています。

移行作業を行うには、当然ながら、実際に稼働しているネットワークに接続することが必要です。WIDE プロジェクトの 6-Bone コミュニティでは、IPv6 のインストール大会等を開催して、IPv6 の動作環境を実際に作って貰い、その経験を参加者の組織に持ち帰って貰うという普及のための活動も積極的に行っています。2 年間の実験運用を経て、IPv6 のネットワークを、常に健康に動いている状態に保つためのノウハウがかなり蓄積されており、増え続ける参加組織に対してそれを広めているのです。

6-Bone-JP は、IPv6 を使っている世界でも最大級のネットワークです。その中では、KAME プロジェクトの成果であるプロトコルスタックが、主に使われています。また、今は独立したネットワークですが、中国ではいくつもの大学を接続した IPv6 ネットワークが稼働しており、そこでも KAME のプロトコルスタックの上にさまざまな開発が行われています。

3.4 IPv6 の DNS

IPv6 における DNS について考えてみましょう。IPv6 に対応した DNS では、正引きに AAAA (Quad A) レコードが使われます。

```
$ORIGIN mew.org.  
ftp AAAA 3ffe:501:8:1234:260:97ff:fe40:efab
```

図 11 : AAAA レコードの例

逆引きのPTRレコードでは、IP6.INTという特別なドメインを使用します。

```
$ORIGIN 4.3.2.1.8.0.0.0.1.0.5.0.e.f.f.3.IP6.INT.  
b.a.f.e.0.4.e.f.f.f.7.9.0.6.2.0 PTR ftp.mew.org.
```

図 12 : IPv6 の PTR レコードの例

IPv4 のホストが IPv6 のアドレスを引き出すことができる、逆に IPv6 のホストが IPv4 のアドレスを引き出すことができるといったように、DNS は相互に利用できるしくみが既に作られており、root サーバの運用も開始されています (図 13)。

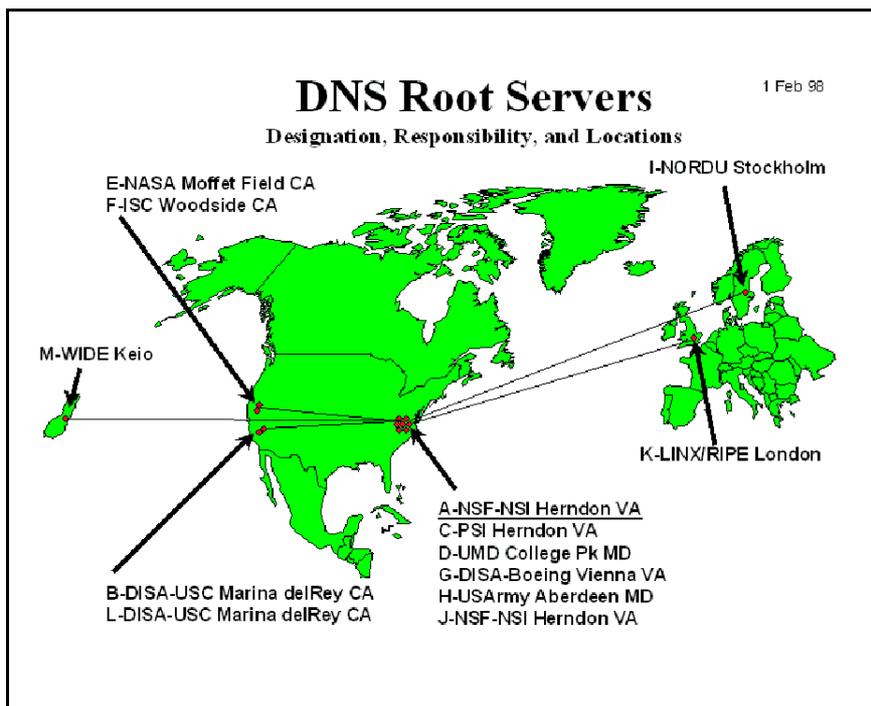


図 13 : DNS Root サーバの運用

3.5 IPv4 から IPv6 へ

IPv6 インターネットの標準化作業のために、IETF の次のような組織が活動を行っており、いくつものドキュメンテーションが発表されています。

- IPNG (IP Next Generation) ワーキンググループ
- NGTRANS ワーキンググループ (移行に関する事柄を検討)

IPv6 のデプロイメントを推し進めるためには、このような組織にエンジニアを送り込み、移行作業に係わっていくことも重要なこととなります。現在、既に標準化が行われている技術には、図 14 のようなものがあります。

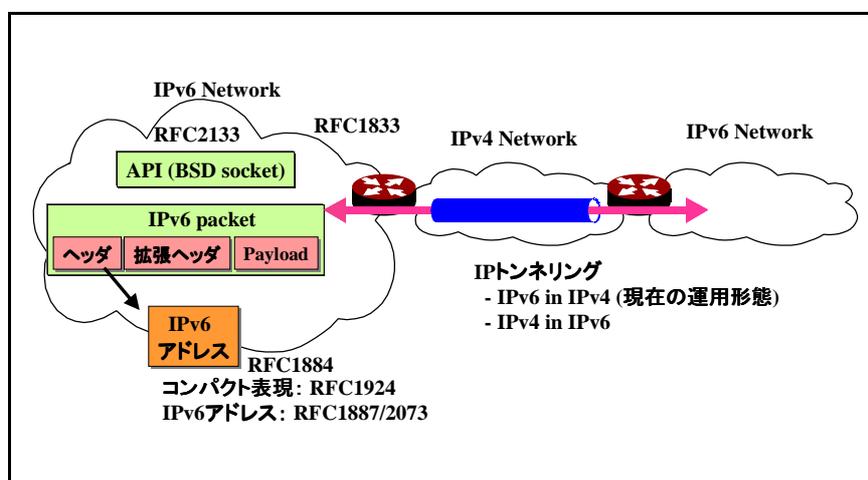


図 14：標準化された機能

IPv4 から IPv6 への移行期においては、トンネリングの技術が重要なものとなります。IPv6 ネットワークが未完成な間は IPv4 ネットワークを通して IPv6 パケットを伝送することが必要です。また、IPv6 への移行がほとんど終了した後も、IPv4 ネットワークがかなりの長期間にわたって残ると考えられますから、IPv6 ネットワークを通して、IPv4 パケットを伝送することも必要となるでしょう。

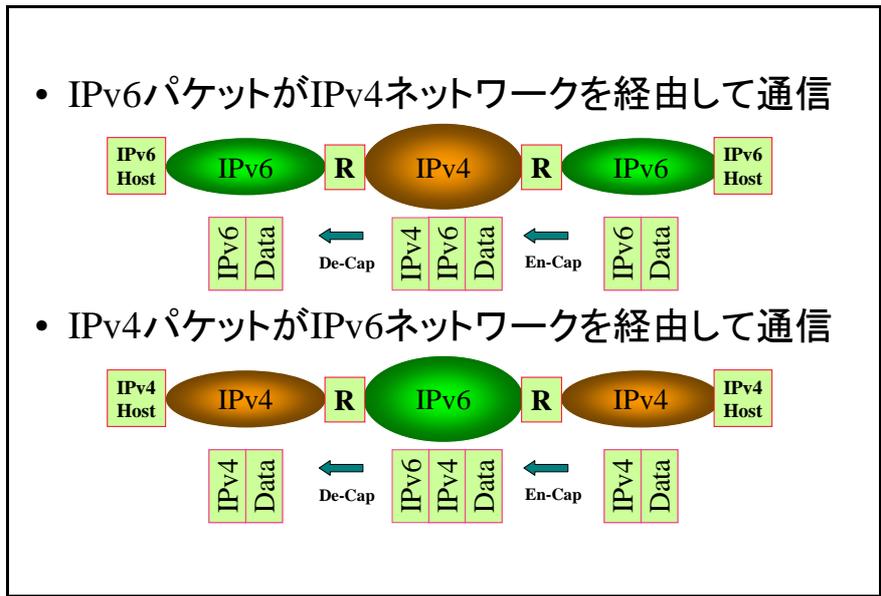


図 15 : トンネリングによる接続

IPv4 ネットワークと、IPv6 ネットワークが直接やりとりをする場合には、どこかでアドレスを付け替える必要があります。ここで使われるのが NAT です。IPv4 のプライベートアドレスとグローバルアドレスを付け替えるものではなく、エンド - エンドの通信に対してトランスペアレントに動作することに注意してください。

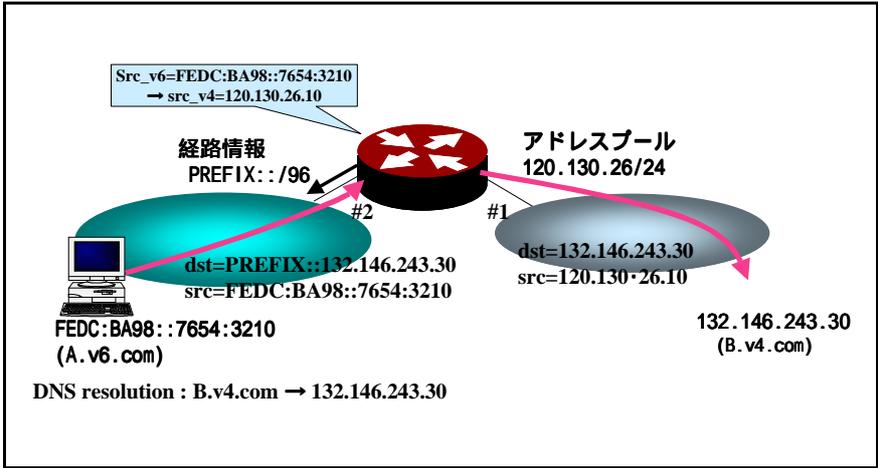


図 16 : NAT による IPv6/IPv4 の相互接続

既に多くのマシン（オペレーティングシステム）に、IPv6 と IPv4 の両方のプロトコルスタックが搭載されています。BSDI、FreeBSD、Linux、Solaris、Macintosh、Windows NT/2000 等での実装が既に稼働しています。特に、KAME プロジェクトの成果は、多くの PC 上で稼働しており、PC ルータとしての利用も多くなっています。両方のプロトコルスタックを搭載したデュアルスタックマシンは、移行期における強力な道具となることでしょう。

デュアルスタックを実現する実装の中には、IPv4 のネットワークドライバの中にトランスレータを埋め込むことによって、オペレーティングシステムやアプリケーションを全く変更する必要がないものも登場しています（図 17）。

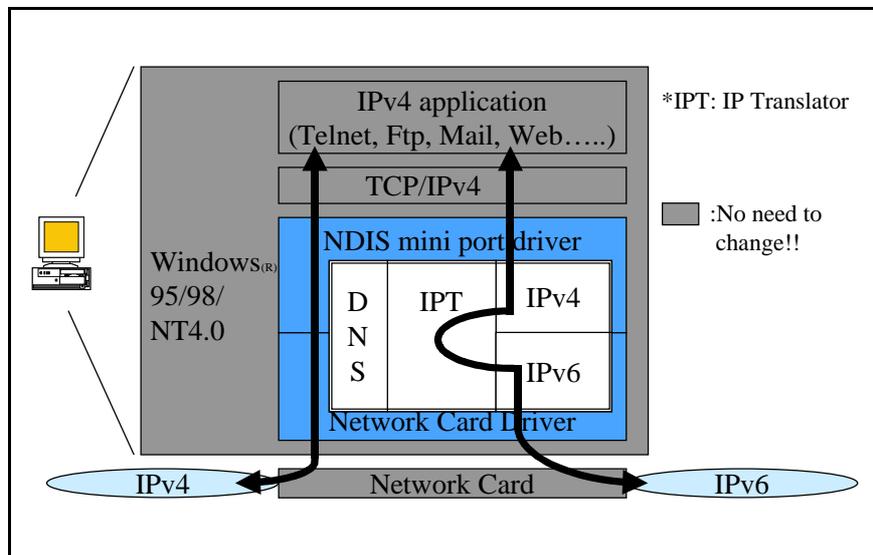


図 17 : Hitachi v6 stack for Win98/95/NT

数多くの実装が登場してくると、それらの間の相互運用性が重要となります。UNH (University of New Hampshire) での実験的な相互運用性テストを始め、KAME プロジェクトの中でも TAHI というプロジェクトを立ち上げて、相互運用性のテストを行っています。

4 まとめ

2000年と2001年は、日本におけるインターネットが everyone/everywhere を目指して走り出す年になると考えられます。その中で、考えなければならぬことをまとめてみましょう。

- とにかく使う。

インストール大会等を利用して、実際に動かして、使ってみる実績を積み上げていかねばなりません。

- 成功例を作る。

組織内ネットワーク、あるいは、あるサービス全体を IPv6 で作り、それが IPv4 のネットワークと親和性を持って動作することを実証するような、大きな成功例が必要となってきます。

- インターネット社会運動に参加する。

日本政府は、すべての学校をインターネットに繋ぎ込み、さらには電子政府を実現させることを真剣に考えています。そのためには、広範な普及が必要であり、IPv6 への移行を真剣に考えていかなければなりません。

皆さんが IPv6 の普及を真剣に考え、クリエイティブな新しいビジネスを自由に展開できる、Native なインターネットを作る作業に参加されることを心より願います。

コラム：KAME プロジェクト

IPv4 による TCP/IP ネットワークの初期において、BSD UNIX に TCP/IP が組み込まれたことは、最も重要な出来事の 1 つとして忘れることができません。TCP/IP のプロトコルスタックがソースコードで配布されたことによって、プロトコルへの理解とさまざまな機器への実装がどれほど加速されたことでしょうか。

こんな逸話があります。traceroute というソフトウェアが発表されたときに、BSD UNIX のプロトコルスタックにあったバグが顕在化しました。ところが、同じバグを持った、すなわち BSD のコードをそのまま利用していたネットワーク機器が、多数発見されたのです。もちろん、これは BSD の実装とソースコード公開に対する大きな勲章です。

インターネットの歴史を紐解いてみると、実は日本のエンジニアによる貢献が非常に大きなものであることが分かります。ところが、マスコミ等の一般的な理解としては、インターネットは米国のものであると思われています。実際にインターネットの普及に携わってきた者にとっては、大変に悔しいことです。

IPv6 への移行は、ある意味で、インターネットのしきり直しです。IPv4 インターネットにおいて、BSD のソースコードが果たしたのと同じ役割を担うことを目標として、KAME プロジェクトがスタートし、プロトコルスタックをはじめとするソフトウェアの開発と公開を行ってきました。現在、KAME の成果はいくつかのベンダー製品にも組み込まれていますし、最も優れた実装の 1 つとして高く評価されています。